引文：张对红，李玉星. 中国超临界 CO_2 管道输送技术进展及展望[J]. 油气储运，2024，43（5）：481-491.
ZHANG Duihong, LI Yuxing. Development and prospect of supercritical CO_2 pipeline transmission technology in China[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(5): 481-491.

中国超临界 CO_2 管道输送技术进展及展望

张对红[1]　李玉星[2]
1. 国家管网集团科学技术研究总院分公司；2. 中国石油大学（华东）储运与建筑工程学院·山东省油气储运安全重点实验室

摘要：【目的】随着“双碳”目标任务持续推进，中国的碳捕集、利用与封存（Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS）作为实现大规模碳减排的托底技术迅速发展，作为 CCUS 产业链中连接上下游的关键环节——CO_2 管道工程建设也迎来了黄金发展机遇。然而，中国 CO_2 管道工程建设起步较晚，为了推动中国 CO_2 管道工程建设与发展，亟待对 CO_2 管道输送关键难题与核心技术开展系统攻关，并建立 CO_2 管道输送技术标准体系。**【方法】**基于文献调研对中国 CO_2 管道输送技术发展现状进行梳理评述，从 CO_2 相特性、管输工艺、管道安全、软件仿真、标准规范等方面总结分析了 CO_2 管道输送技术的重要进展，并根据中国的碳源碳汇分布特点对未来 CO_2 管道规划及管输技术发展提出建议与展望。**【结果】**与欧美国家相比，目前中国长距离超临界 CO_2 管道工程较为欠缺，仅齐鲁石化—胜利油田的密相 CO_2 管道工程建成投产，此外大庆石化、吉林石化 CO_2 管道工程处于初步设计阶段，未来 CO_2 管道工程建设将持续加速。**【结论】**中国的超临界 CO_2 管道输送已拥有一定的技术储备，但在中试试验的测试及理论模型改进方面仍需继续攻关，同时应加速推动相关技术的工程示范应用，完善 CO_2 管道输送技术标准体系，以期为未来区域千万吨级 CO_2 管道运输网络以及区域间 CO_2 干线管道规划建设提供全面有力支撑。（图 1，表 1，参 49）

关键词：CCUS；超临界 CO_2 管道；管道输送；发展规划
中图分类号：TE832　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000-8241（2024）05-0481-11
DOI：10.6047/j.issn.1000-8241.2024.05.001

Development and prospect of supercritical CO_2 pipeline transmission technology in China

ZHANG Duihong[1], LI Yuxing[2]
1. PipeChina Institute of Science and Technology; 2. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (East China)// Shandong Key Laboratory of Oil & Gas Storage and Transportation Safety

Abstract: [Objective] Amidst the ongoing pursuit of “dual carbon” goals, Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) has rapidly progressed as a foundational technology facilitating significant carbon emission reductions in China. Serving as a crucial link between upstream and downstream activities in the CCUS industry chain, the construction of CO_2 pipelines is capitalizing on its golden development opportunities. To propel the construction and growth of CO_2 pipelines in China, a relative latecomer in this realm, it is imperative to systematically address key challenges and core technologies associated with CO_2 pipeline transmission while establishing a comprehensive technical standard system. **[Methods]** Literature research was undertaken to review and evaluate the current development status of CO_2 pipeline transmission technologies. The significant advancements in CO_2 pipeline transmission technologies were summarized through an in-depth analysis of various facets such as CO_2 phase behaviors, the pipeline transmission process, pipeline safety, software simulations, and standards and specifications. Recommendations and future outlooks for planning CO_2 pipelines and developing pipeline transmission technologies were delineated, considering the distinctive characteristics of carbon sources and sinks in China. **[Results]** In contrast to European nations and the United States, China faces a shortage in establishing long-distance supercritical CO_2 pipelines. Currently, the only operational project is a dense phase CO_2 pipeline linking the facilities of Sinopec Qilu Petrochemical Company (Qilu Petrochemical) with Shengli Oilfield. Additionally, the CO_2 pipeline projects of PetroChina Daqing Petrochemical Company (Daqing Petrochemical) and

Sinopec Jilin Oil Products Company (Jilin Petrochemical) remain in the preliminary design phase. As a result, it is foreseeable that the pace of CO_2 pipeline construction in China will increase in the future. **[Conclusion]** China has developed a certain level of technical expertise for supercritical CO_2 pipeline transmission. However, additional endeavors are required to address challenges in pilot testing and enhance theoretical models. Simultaneously, there is a need to advance engineering applications to demonstrate related technologies and enhance the standard system of CO_2 pipeline transmission technologies. These steps are crucial to offer extensive and strong support for planning and building regional ten-million-ton CO_2 pipeline transmission networks and interregional CO_2 trunk pipelines in the future. (1 Figure, 1 Table, 49 References)

Key words: CCUS, supercritical CO_2 pipeline, pipeline transmission, development planning

自 20 世纪六七十年代环境问题进入社会和政治议程以来，“低碳”已经成为世界各国共同关注的问题。2015 年 12 月 12 日，《联合国气候变化框架公约》近 200 个缔约方在巴黎达成新的全球气候协议《巴黎协定》，确定如下目标：将全球平均气温较工业化前水平升高的幅度控制在 2 ℃之内，并承诺“尽一切努力”使其不超过 1.5 ℃，从而避免“更灾难性的气候变化后果”。温室气体减排是实现温控的重要手段，2020 年 9 月，中国在第七十五届联合国大会上郑重承诺：中国将力争于 2030 年前实现 CO_2 排放量达到峰值，努力争取于 2060 年前实现碳中和[1]。

碳捕集、利用与封存（Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS）是一项有望实现化石能源大规模碳减排及碳利用的技术，是中国未来减少 CO_2 排放、实现可持续发展的重要手段。2021 年，国家“十四·五”经济和社会规划明确提出实施碳捕集、利用与封存等重大项目示范，CO_2 减排已成为重点发展战略，中国将迎来 CCUS 项目的大规模建设与发展。CO_2 输送是 CCUS 产业链中连接 CO_2 捕集与利用封存之间的关键环节，CO_2 运输效率及成本将直接影响 CCUS 整体规模与经济效益[2]。目前中国已开展的 CCUS 项目的碳源供给主要以车载运输为主，只有少数油田 CCUS 中的强化采油技术（Enhanced Oil Recovery, EOR）项目采用管道输送，且已建 CO_2 管道距离较短、输量较小、以气相或液相输送为主。与国际 CCUS 产业相比，中国 CO_2 运输效率较低、成本较高，为提升 CO_2 运输能力、提高运输效率、降低运输成本、满足未来 CCUS 产业发展需求，需要采用更经济的 CO_2 运输方式——超临界 CO_2 管道输送[3-4]。

中国 CO_2 管道建设相比欧美国家起步较晚，CO_2 管道输送关键技术研究与发展相对滞后，标准规范体系尚不完善。为促进中国 CCUS 产业链和 CO_2 管道发展，调研中国 CO_2 管道工程发展现状，总结分析当前 CO_2 管道关键技术研究现状，结合中国碳源碳汇分布特点，对未来 CO_2 管道规划和技术需求进行了展望。

1 中国 CO_2 管道工程发展现状

相比国外已有近万千米 CO_2 管道而言，中国 CO_2 管道建设起步较晚，过去几十年仅有大庆油田、吉林油田 CO_2 驱油示范工程的短距离、气态或液态 CO_2 管道成功建设运行（表 1，2023 年统计情况）。

表 1 中国 CO_2 管道工程建设情况统计表
Table 1 Statistics of CO_2 pipelines construction in China

管道名称	所属单位	输气量/（10^4 t·a^{-1}）	管道长度/km	建成时间	输送工艺
齐鲁石化—胜利油田	胜利油田	100.0	109.0	2023 年	密相
正宁电厂—长庆油田	长庆油田	150.0	98.0	待建	超临界
大庆石化—大庆油田	大庆油田	140.0	127.0	待建	超临界
		60.0	15.0	待建	超临界
吉林石化—吉林油田	吉林油田	410.0	127.0	待建	超临界
		330.0	131.0	待建	超临界
		80.0	115.0	待建	超临界
正理庄油田 CO_2 管道	胜利油田	50.0	8.0	2008 年	气态
长深 4—黑 59 CO_2 管道	大庆油田	10.0	13.8	2013 年	气态
徐深 9—树 101 联合站 CO_2 管道	大庆油田	4.8	20.0	2013 年	气态

齐鲁石化—胜利油田 CCUS 项目是中国首个百万吨级 CCUS 示范项目，目前已经投产运行[5]。该管道全长约 109 km，管径 300 mm，采用 L360 管线钢管，设计压力 12 MPa，设计输量 100×10^4 t/a，从齐鲁石化首站途经稷下阀室、凤凰阀室、起凤阀室、荆家阀室、高城阀室至高青末站。该管道的成功投产标志着中国工业规模 CO_2 管道正式进入百公里、百万吨的“双百”行列。

长庆油田 CO_2 管道项目始于正宁电厂，止于长庆油田西峰油田，管道全长约 98 km，管输介质为体积分数 99.99% 的高纯超临界 CO_2，管径 300 mm，设计压力 12 MPa，进口温度 40 ℃，设计输量 150×10^4 t/a，设首站 1 座、末站 1 座、沿线阀室 6 座。

大庆油田 CO_2 管道碳源来自大庆石化和中油电能，经过捕集、脱水、增压后 CO_2 体积分数达到 99.9%。其中大庆石化—敖南注入站的主线管道分为两段，分别为长 9 km 的厂际管道与长 118 km 的干线管道，管径分别为 300 mm、200 mm，设计输量分别为 140×10^4 t/a、60×10^4 t/a；支线中油电能—卧里屯首站管道长 15 km，管径 200 mm，设计输量 60×10^4 t/a。所有管道均采用超临界态输送，设计压力 14.5 MPa，进口温度 50 ℃。

吉林油田 CO_2 管道气源来自吉林石化，干线至宽城分输站由两条支线分输至大情字末站及莫里青末站，经过捕集、脱水、增压后 CO_2 体积分数达到 98%。干线和两条支线管道分别长 127 km、131 km、115 km，管径分别为 450 mm、400 mm、250 mm，设计输量分别为 410×10^4 t/a、330×10^4 t/a、80×10^4 t/a。全线采用超临界态输送，首站出站压力为 14.5 MPa，出站温度为 50 ℃。

2 中国 CO_2 超临界管道输送技术进展

2.1 相特性及管输工艺

2.1.1 物性及相特性

由于 CO_2 排放源中的 CO_2 含量（体积分数）无法满足管输要求，管输之前需要进行 CO_2 捕集提纯，采用的捕集方法不同，管输介质所含杂质种类及组成也不同。目前碳捕集方法大致分为：富氧燃料燃烧法（CO_2 体积分数为 75.00%～99.95%）、预燃烧法（CO_2 体积分数为 95.0%～99.7%）及后燃烧法（CO_2 体积分数为 99.7%～99.9%）[6]。常见杂质按照极性可划分为极性杂质（SO_x、NO_x、H_2S）与非极性杂质（Ar、CO、N_2、H_2、O_2、CH_4）[7]。研究表明，杂质的增加对 CO_2 管输工艺及管输设备影响极大，包括：改变临界压力与临界温度，使 CO_2 的气液两相区面积增大，相同运行条件下更易发生相变[8]；杂质的存在将降低 CO_2 的质量输送效率，影响管路压降及压缩机工作状态；不同杂质会对 CO_2 管道带来不同风险，SO_x、NO_x、H_2S、CH_4、H_2 等杂质部分具有毒性，部分可能导致腐蚀、水合物堵塞及氢脆等，同时影响泄漏发生后 CO_2 的减压波特性及焦耳-汤姆逊效应[9]。因此，CO_2 相特性及物性计算的准确性是开展 CO_2 管道设计、安全风险评价及完整性管理的基础前提。

目前计算纯 CO_2 物性与相特性最精准的方法是使用 Span-Wanger 状态方程；而对于 CO_2 混合物体系，Kunz 和 Wagner 提出的 GERG-2008 状态方程更适用；中国学者对于其他状态方程在 CO_2 混合物相特性及物性计算方面也做了适应性分析评价[10]。然而，含杂质 CO_2 体系的相平衡特性实验数据尚不足以支撑改进当前计算模型，亟需开展多杂质体系的 CO_2 混合体系相平衡实验，以验证并修正现有状态方程，为管输工艺计算提供准确的物性及相特性数据。

2.1.2 管输工艺

CO_2 管输工艺水力热力参数的精准计算可以在保证安全设计的前提下节省建设投资，这对 CO_2 相特性、物性及水力热力计算精度提出了较高要求[11]。中国石油大学（华东）李玉星教授团队建立了超临界 CO_2 管道稳态水力计算理论模型[12-13]，被纳入 SH/T 3202—2018《CO_2 输送管道工程设计标准》，并在齐鲁石化 CO_2 管道设计中得到应用与验证。在 CO_2 管道实际运行过程中，会时常发生投产、停输再启动、开关泵站及清管等瞬态工况[14-16]，此时管内温度及压力的变化规律尚不明确，相比稳态输送其危险性更大。中国对于 CO_2 瞬态管输过程的模拟方法及工具手段仍处于探索研究阶段，当前 CO_2 管道工艺流程及稳态瞬态计算均依赖于 OLGA、Ledaflow、Hysys 及 Fluent 等商业化软件，缺乏自主研发的理论计算模型，导致软件国产化及标准制定迟滞不前。

2.2 管道安全

CO_2 管道运行过程中，腐蚀穿孔或第三方破坏可能引发管道泄漏等安全问题，对管道设计、管道材料选择及完整性管理提出了挑战，亟需针对管道腐蚀、泄漏

扩散、裂纹扩展等问题及适用性管道材料、设备开展深入研究。

2.2.1　腐蚀

CO_2 管道腐蚀控制取决于压力、温度等工作参数以及 H_2O、H_2S、O_2、SO_2 等杂质含量，其中含水量是最重要的腐蚀影响因素[17-18]。目前，中国石油大学(华东)、华北电力大学及北京科技大学等针对 X65、X70、X80 管材，开展了高压、高温条件不同杂质及含量下超临界 CO_2 腐蚀特性研究[19-22]。

针对含水量对内腐蚀的影响研究表明，随着含水量升高，均匀腐蚀速率升高，而点蚀是超临界 CO_2 管道内腐蚀的主要腐蚀行为[23]。SO_x、NO_x、H_2S 等酸性气体杂质的腐蚀过程均由电化学反应主导，其溶于析出液膜中形成酸加速阴极、阳极反应，从而促进电化学腐蚀。在多杂质耦合对内腐蚀影响机理方面，相比仅存在 O_2 的情况，同时存在 O_2、SO_2、H_2S 时腐蚀情况更加严重，说明杂质之间存在协同作用[19]，需进一步开展实验研究建立腐蚀理论模型，明确多元杂质的协同作用腐蚀机理。

2.2.2　泄漏扩散

CO_2 是一种无色无味且无毒的气体，但具有极强的窒息性。在国家职业卫生标准 GBZ 2.1—2019《工作场所有害因素职业接触限值 第1部分：化学有害因素》中明确了 CO_2 是引起窒息性疾病甚至死亡的气体，并规定了工业工作环境 CO_2 的加权平均容许质量浓度(Permissible Concentration-Time Weighted Average, PC-TWA)为 9 000 mg/m^3，即体积分数 0.5%。因此，CO_2 管道泄漏之后的扩散规律是安全风险评估及制定相关标准、应急处置方案的重要理论基础[24]。

目前国外仅有挪威船级社(DET NORSKE VERITAS, DNV)开展过工业级的 CO_2 管道泄漏扩散实验，并以实验数据结合理论模型研发了 Phast 商业计算软件。在中国，中国石油大学(华东)李玉星教授团队、大连理工大学喻健良教授团队等搭建了 CO_2 泄漏扩散实验装置，开展了 CO_2 泄漏扩散规律实验[25-26]，分析了泄漏孔径、初始温度、初始压力等参数对泄漏扩散规律的影响，但关于杂质尤其如 H_2S、SO_2 等毒性杂质的扩散规律有待进一步研究。CO_2 泄漏扩散实验的时间、硬件成本及危险程度很高，且特殊场景或天气条件等在实验中很难复现，因此许多学者探索使用 Phast、Fluent 等商业软件进一步开展 CO_2 泄漏扩散模拟分析[24,27-28]。同时，CO_2 具有极强的焦耳-汤姆逊效应且易发生相变，如果不能很好地控制泄放速率，泄漏或放空后在管内会造成最低约 −79 ℃的低温，而工程上 CO_2 管道常采用 X52、X60 等管线钢，其韧脆转变温度一般为 −30～−60 ℃，因此，泄漏产生的低温对管材的韧性水平提出极大挑战。

总体而言，泄漏扩散会带来两个问题：① CO_2 及危险杂质的危险浓度扩散范围的确定；②管内低温效应的影响范围的确定。目前中国学者虽然利用软件对这两个问题进行了模拟研究，但终究缺乏实验数据验证支撑，无法为工程设计、标准制定提供足够的定量指导。

2.2.3　减压波与韧性止裂

CO_2 管道发生泄漏后不仅会造成管外风险，管内 CO_2 在降压过程中产生的减压波也会使管内维持较高的压力水平，为裂纹扩展提供能量，导致裂纹持续扩展无法止裂[29-30]。因此，CO_2 减压波及韧性止裂研究是 CO_2 管道安全设计、风险评价及完整性管理的重点和难点。

减压波特性是 CO_2 管道裂纹扩展的根本原因[31]，目前国内外开展了一部分 CO_2 减压波实验研究以明确 CO_2 减压波的机理及影响因素。国外尤其是在欧洲和美国，较早开展了 CO_2 减压波实验，代表团队有 Botros[32]和 Cosham[33]。到目前为止，中国开展了 4 次 CO_2 减压波实验，其中大连理工大学喻健良教授团队在 2016 年搭建了管径 273 mm、壁厚 20 mm、长 258 m 的 CO_2 管道泄放实验装置，并开展了 3 次气相、密相及超临界相的减压波实验[34-35]。中国石油大学(华东)的李玉星教授团队在 2023 年搭建了管径 219 mm、壁厚 16 mm、长 22 m 的 CO_2 管道泄放实验装置，并开展了气态 CO_2 减压波实验。

减压波预测模型以 DNV 及英国国家电网最初建立的 DECOM 模型为代表，中国有学者以此为基础对模型进行改进[36]，并针对不同因素开展了大量分析。为更精确地探究减压波规律，部分学者采用更准确的计算流体力学软件[37-38]，采用高精度状态方程描述 CO_2 物性并对减压波实验进行模拟，取得了很好的效果，为后续开展 CO_2 泄漏、放空等快速减压过程模拟提供了研究方法。

基于上述 CO_2 减压波研究，国内外先后开展了难度更高的 CO_2 管道全尺寸爆破试验，以研究管道的裂纹扩展规律及止裂性能。截至目前，国外共开展了

12 次 CO_2 大规模全尺寸爆破试验，中国在 2022 年开展了 3 次全尺寸爆破试验，而在此之前，中国在天然气管道建设过程中也积累了一定全尺寸爆破试验经验[39]。2015 年，中国石油天然气集团有限公司在新疆哈密建立了天然气管道全尺寸爆破试验场，开展了管径 1 422 mm、压力 16 MPa 与管径 1 219 mm、压力 20 MPa 两种管径与压力等级的天然气管道全尺寸爆破试验[40]，解决了全尺寸爆破试验中安全可靠的起爆方式设计、初始裂纹设计、试验管道长度设计、关键数据采集设计及止裂评价模型的应用等关键技术难题，为当前 CO_2 管道全尺寸爆破试验提供了方法及理论基础。

2023 年 5 月，国家石油天然气管网集团有限公司开展了 1 次全尺寸爆破试验(图 1)，选用 X65 管线钢管，管径 324 mm、壁厚 7.2 mm，试验压力 12 MPa，管输介质组成为 95%CO_2+4%N_2+1%H_2。2023 年 8 月，中国石油天然气集团有限公司以管径 324 mm、壁厚 7.2 mm，初始条件为 13.6 MPa、24 ℃的含 N_2 与 Ar 的 CO_2 混合物为背景开展了 1 次全尺寸爆破试验。两次试验获得了减压波速、裂纹扩展速度及相同管径、壁厚下不同夏比吸收能量的韧性止裂结果，并与 ISO 27913-2016《二氧化碳捕获、运输和地质储存管道运输系统》和巴特尔双曲线(Battelle Two-Curve, BTC)模型计算结果进行对比分析及止裂韧性评价，这是中国在 CO_2 管道工程上取得的突破性进展，为中国 CO_2 管道韧性止裂风险评价及相关标准制定奠定了数据基础。此外，大连理工大学喻健良教授团队搭建了管径 106 mm、壁厚 4 mm、长 16.7 m 的小型 CO_2 全尺寸爆破试验装置，通过加热超压的方式实施爆破控制，爆破时的压力为 8.82 MPa，温度为 35.5 ℃，为中国小规模 CO_2 管道爆破试验做出探索性尝试[41]。


(a)爆破前

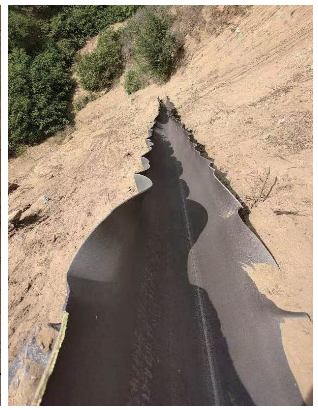

(b)爆破后

图 1　CO_2 管道全尺寸爆破试验爆破前后对比图
Fig. 1　Comparison before and after full-scale burst test of CO_2 pipeline

工业级的 CO_2 全尺寸爆破试验成本高、数据采集难度高、准备周期长，因此，学者开始探索数值模拟方法，目前中国已有学者针对天然气管道全尺寸爆破成功开展流固耦合的裂纹扩展模拟[42]。但是，由于 CO_2 物性及相特性较复杂，该模拟方法用于 CO_2 管道尚需改进。在韧性止裂模型方面，BTC、日本高强度管线钢管委员会(High-strength Line Pipe, HLP)、DNV 等止裂评价模型仅适用于大口径、高钢级管道的止裂预测[43]，对于百万吨级小口径、低钢级 CO_2 管道的适用性有待验证，而且目前实验数据稀少，无法对模型提出实质性改进。后续亟待开展小口径、低钢级 CO_2 管道全尺寸爆破试验，以期为建立和修正止裂模型提供数据支撑。

2.2.4　管道材料

CO_2 管道材料面临溶解萃取、腐蚀、泄漏低温、韧性断裂等风险难题，因此选择管材及密封材料需要考虑以下因素：①超临界 CO_2 作为工业溶剂，溶解性极强；②当液态水存在时，CO_2 与 H_2S 会部分溶解造成管道及设备腐蚀；③当管道发生泄漏而压力、温度同时骤降时，管道材料长时间处于低温(−79 ℃)下，存在脆性断裂风险；④ CO_2 管道相比天然气管道更易发生快速扩展的韧性断裂，对材料的断裂性能要求更高。根据中国钢管生产厂家的数据，X52、X60、X65 及 X70 钢管的韧性分布为 107～441 J，目前正在研发适用于超临界 CO_2 管道的钢管材料。此外，X52、X60、X65 及 X70 钢管的韧脆转变温度为 −60～−30 ℃，而 CO_2 泄漏或放空过程管内最低温度可降至 −79 ℃，因此，对于 CO_2 管道材料，除考虑止裂韧性外，还需考虑预防低温脆断的能力。

2.2.5　管道设备

相比油气管道，超临界 CO_2 管道输送增压设备的增压范围更宽，可达 25 MPa；增压相态更复杂，包括气相、密相、超临界相等相变过程；增压形式更多样，如压缩机+泵增压形式；选材更苛刻，需要应对低温、腐蚀、低润滑性等；级间温度控制更严格等。

通常往复式压缩机对于小排量更经济适用，离心式压缩机对于大排量更经济适用。一般情况下，对于超临界 CO_2 管道输送，压缩机类型需要根据项目实际进口流速及出口所需压力来确定，当压缩机入口实际体积流量低于 1 000 m^3/h 时，适于选择往复式压缩机；

当压缩机入口实际体积流量高于 1 000 m^3/h 时，适于选择离心式压缩机。在压缩机方面，中国的沈阳透平机械股份有限公司、西安陕鼓动力股份有限公司在 CO_2 电驱离心式压缩机技术领域拥有丰富的经验。2022 年，沈鼓集团股份有限公司设计制造的全国首台百万吨级 CO_2 离心压缩机试车成功并在齐鲁石化 CCUS 项目中正式投用。2021 年，中国船舶集团七一一所提供的两台 CO_2 压缩机在海南福山油田 CCUS 项目中投产运行，CO_2 年处理量达到 9×10^4 t。在柱塞泵方面，宁波合力机泵有限公司设计制造了 CO_2 注入泵，相关系列泵为三柱塞、五柱塞单作用卧式柱塞泵，进口压力 1.5～7.0 MPa，出口压力 10～50 MPa，泵前端配合喂液泵使用。该系列泵额定排量相对离心泵通常偏小，最大排量约 200 m^3/h，主要在江苏油田、吉林油田等 CO_2 驱油区块使用，配合碳捕集封存及提高油田采收率（Carbon Capture and Storage-Enhanced Oil Recovery, CCS-EOR）应用于小规模液态 CO_2 注入的油田开发项目。在计量方面，当 CO_2 为超临界及密相流时，科里奥利质量流量计的测量受气液解耦作用影响而产生负误差，受流体可压缩性影响产生正误差，同时杂质对质量流量计的影响也较大。此外，孔板流量计只适用于单相介质的测量且压力损失较大，文丘里流量计压力损失较小、设计简单、制造成本较低，但需要较长的上游直管段，相对而言，差压式流量计更适用于 CCS 过程。

2.3　仿真软件及标准规范

2.3.1　仿真软件

目前国内外认可度较高的行业商业计算软件有 OLGA、Ledaflow、Hysys、Phast、Fluent 等。OLGA 和 Ledaflow 属于同一类软件，均针对不同工况管内参数的瞬态及稳态计算[44]，工程设计中 OLGA 使用频率更高[45]，Ledaflow 仅作 OLGA 计算结果的参考对比之用，目前两款软件对于 CO_2 管道瞬态计算的适用性评价尚无明确定论。Hysys 内置了丰富的状态方程，包括 SW、GERG-2008 等高精度状态方程[46]，其优势在于具有精准的物性及相特性计算能力，以及与化工流程计算及多软件协同优化仿真能力。虽然 Hysys 也兼具常见的水力热力计算能力，但与 OLGA、Ledaflow 相比不是强项，在 CO_2 管道初设阶段的水力热力计算中可作为对比验证手段。Phast 由 DNV 基于大量实验数据构建的半理论半经验公式组建而成[47]，内置了常见的物性状态方程及化工材料属性库，其中包括 CO_2 材料与 PR 状态方程。对于 CO_2 泄漏扩散的模拟是基于统一色散模型（Unified Dispersion Model, UDM）及 DNV 开展的大量 CO_2 扩散实验数据构建的经验关联式，殷布泽等[24]对其进行了准确性验证，整体来看，Phast 对 CO_2 泄漏远场扩散浓度的模拟结果较准确，但较大幅度低估了近场 CO_2 峰值浓度。Fluent 是非常成熟的计算流体力学流场分析软件，通过其他软件对几何模型进行二维或三维的网格离散，将控制方程在网格中进行有限体积求解，进而得到每个时刻的全部物理场参数。Fluent 的强大之处在于其具有高度的自定义函数功能，可以植入相变模型及高精度状态方程。国内已有学者探索出准确模拟 CO_2 泄漏的模拟方法[28,37]。

综上，上述软件的适用范围不同，OLGA、Ledaflow、Hysys 适用于管输水力热力计算，其中 OLGA、Ledaflow 适用于瞬态的水击停输、投产等工况。Phast 则专注于管外的泄漏扩散，适用于 CO_2 管道的安全风险评估。Fluent 近乎兼具上述功能，但因其离散及求解特点，对于工业级模型计算的硬件及时间成本极高，不适用于长距离管道的流动模拟分析。在实际应用中，需要根据计算需求及周期合理选择计算软件。

2.3.2　标准规范

国外尤其是欧美国家在 CO_2 管道建设及运行方面实践经验丰富，但与油气管道相比，世界范围内 CO_2 管道建设数量仍较少，而且国际上针对 CO_2 管道输送的标准并不统一，相关标准多涵盖在通用液体管道输送标准中。目前，CO_2 管道设计、运行及管理标准的制定主要由国际标准化组织（International Organization for Standardization, ISO）及 DNV 主导[48]。

随着中国“双碳”目标任务持续推进，CO_2 管道规划建设势在必行，但当前缺乏完整的 CO_2 管输技术标准体系。目前中国仅有 SH/T 3202—2018《二氧化碳输送管道工程设计标准》与 GB/T 42797—2023《二氧化碳捕集、输送和地质封存管道输送系统》对陆上 CO_2 管道工程的设计与施工提出要求[49]。为加快完善 CCUS 标准体系建设、推动 CCUS 技术发展与应用，国家管网集团科学技术研究总院分公司建立了覆盖超临界 CO_2 管道全生命周期的标准体系，发布了 19 项超临界 CO_2 管道工程建设核心企业标准，立项《进入长输管道二氧化碳介质质量要求》国家标准。此外，

中国石油集团石油管工程技术研究院、大庆油田设计院等单位也在 CO_2 管道基础共性、立项设计、建设验收、运行维护及完整性管理等方面积极筹备修订现有标准或起草新标准。

3　中国 CO_2 管道未来规划与技术需求

3.1　未来规划

中国适宜开展 CCUS 的大型 CO_2 排放源地域特点明显，主要分布在华东、华北、华中等地区，以火电厂、钢铁厂、水泥厂等为代表的大型固定 CO_2 排放源是未来部署 CO_2 捕集技术的主要对象。中国适宜开展 CO_2 地质封存与利用的碳汇分布同样表现出极强的地域特点，主要环绕渤海湾盆地、鄂尔多斯盆地、南华北盆地、四川盆地等区域，将 CO_2 用于油田强化驱油或进行地质封存[2]。中国碳源和碳汇的空间错位分布格局对规划建设 CCUS 专用 CO_2 管道基础设施、提升源汇匹配水平提出更高的要求。在碳中和目标约束下，CCUS 技术未来减排需求将快速增长，其规模化发展将对长距离 CO_2 专用运输管网及其配套基础设施建设提出新要求。科学合理的源汇匹配可以有序规划 CO_2 管道，缩短不必要的运输距离，从而降低运输成本，为 CCUS 的产业化和规模化提供必要支撑。

因此，未来中国在 CO_2 专用运输管网规划中，应以碳汇的位置及需求量为中心目标，对周围碳源体量与质量进行调研，以兼顾建设成本及环境安全为原则，规划相匹配的管网布局。在 2030 年碳达峰前，需要完成多项示范工程的落地投产运行，并以此作为区域 CO_2 管网的干线核心，向周边其他碳源辐射，使 CO_2 管道成为连接碳源和碳汇的关键纽带及实现 CCUS 的最大助力。

3.2　技术需求

中国 CO_2 管道的关键技术亟待发展，以打通工程化应用的“最后一里路”。其中，相特性测量及计算模型的改进是一切其他科研及设计工作的基础，有了准确的物性描述手段，才能在经济成本与安全两方面找到平衡，对 CO_2 管输工艺进行优化设计。攻关管道腐蚀、泄漏、韧性止裂及管材研发等问题是保障 CO_2 管道安全运行的关键。为实现 2030 年碳达峰，则必须于 2030 年之前，在全国范围内建设数条百万吨级 CO_2 示范管道，形成区域规模化 CCUS 工程 CO_2 运输网络。目前，中国对 CO_2 管道输送关键技术需求主要包括 3 个方面：①迅速搭建中试规模试验平台，在相特性、管输工艺、管道安全等方面开展大量验证性试验，推动相关理论、模型及技术的工程示范应用；②以试验为基础，在现有理论模型基础上，根据中国碳源特点，建立精准的物性相特性计算模型、水力热力计算模型、瞬态模型及减压波韧性止裂模型，形成一套完整的国产化 CO_2 管道输送工艺及安全计算软件；③以上述研究为理论指导，在管道立项、基础设计、建设验收、运行维护及完整性管理等方面建立一套完整的 CO_2 管道规范体系。

此外，当前中国 CO_2 管道技术发展基础薄弱，且 CO_2 管道建设周期长、投资大，由于“双碳”目标下碳减排任务艰巨、时间紧迫，油气管道改输 CO_2 成为另外一条发展路径，其可行性体现在 3 个方面：①部分油气管道设计压力在 10 MPa 以上，满足超临界及密相 CO_2 管输承压；②管径多在 300 mm 以上，可满足百万吨级的年输量需求；③管材钢级多在 X70 以下，韧性止裂性能良好。因此，油气管道具有较好改输 CO_2 的条件，目前亟待开展在役管道改输 CO_2 的关键要素分析、管材强度及寿命预测、设备适应性分析、高后果区再识别等研究，形成在役管道改输 CO_2 的适应性评价方法及流程。

4　结论

中国 CO_2 管道建设起步较晚，目前落地工程少，建设及运行维护经验少。相比 CCUS 的发展需求，在工艺、安全技术及标准规范等方面发展迟缓。为推动中国 CO_2 管道技术及工程建设快速发展，综述了中国 CO_2 管道工程建设及技术发展现状，进而对 CO_2 管道未来规划与技术需求做出展望，得到以下结论：

1）中国 CO_2 管道工程发展历史较短、工业示范工程少、规模小，齐鲁石化—胜利油田百万吨 CCUS 示范工程的投产运行奠定了中国 CO_2 管道建设的新起点。规划中的百万吨百千米大型 CO_2 管道工程有大庆石化—大庆油田、吉林石化—吉林油田、正宁电厂—长庆油田 3 条管道，其有力推动了中国的石油企业、高等院校等科研团体对 CO_2 管道技术的深入系统研究。

2）中国 CO_2 管道技术目前处于起步发展阶段，在 CO_2 管道多项关键技术上缺乏大规模实验研究基础。未来需要在 CO_2 相特性、管道工艺及管道安全等方面

加大投入力度，迅速建设中试规模的试验平台，为理论模型的建立提供数据基础，加快推进软件的国产化及标准规范的系统化。

3）中国的碳源、碳汇分布呈现明显的空间错位特点，且碳汇主要用于油田强化驱油或进行地质封存，这对 CO_2 管道配套基础设施建设及优化碳源碳汇匹配提出更大挑战。未来需要以碳汇的地理位置及需求量为目标，在全国范围内形成以区域 CCUS 项目为中心的百万吨级 CO_2 示范管道干线网络。在碳达峰之后，根据全国碳源情况，综合经济、安全及环保等因素有序规划支线管道，或合理利用油气管道改输，逐渐形成多区域连接的 CO_2 管道网络。

参考文献：

[1] 胡其会，李玉星，张建，俞欣然，王辉，王武昌，等."双碳"战略下中国 CCUS 技术现状及发展建议[J]. 油气储运，2022，41(4)：361-371. DOI：10.6047/j.issn.1000-8241.2022.04.001.

HU Q H, LI Y X, ZHANG J, YU X R, WANG H, WANG W C, et al. Current status and development suggestions of CCUS technology in China under the "Double Carbon" strategy[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(4): 361-371.

[2] 黄维和，李玉星，陈朋超. 碳中和愿景下中国二氧化碳管道发展战略[J]. 天然气工业，2023，43(7)：1-9. DOI：10.3787/j.issn.1000-0976.2023.07.001.

HUANG W H, LI Y X, CHEN P C. China's CO_2 pipeline development strategy under the strategy of carbon neutrality[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(7): 1-9.

[3] 陆诗建，张娟娟，杨菲，王风，刘苗苗，贡玉萍，等. CO_2 管道输送技术进展与未来发展浅析[J]. 南京大学学报（自然科学），2022，58(6)：944-952. DOI：10.13232/j.cnki.jnju.2022.06.002.

LU S J, ZHANG J J, YANG F, WANG F, LIU M M, GONG Y P, et al. Progress and future development trend of CO_2 pipeline transportation technology[J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2022, 58(6): 944-952.

[4] 郭克星，闫光龙，张阿昱，席敏敏，牛爱军. CO_2 捕集、利用与封存技术及 CO_2 管道研究现状与发展[J]. 天然气与石油，2023，41(1)：28-40. DOI：10.3969/j.issn.1006-5539.2023.01.005.

GUO K X, YAN G L, ZHANG A Y, XI M M, NIU A J. Status quo and development of the research on CO_2 capture, utilization and storage technology and CO_2 pipeline[J]. Natural Gas and Oil, 2023, 41(1): 28-40.

[5] 张翼. 我国最长二氧化碳输送管道投运[N]. 光明日报，2023-07-12(10).

ZHANG Y. The longest carbon dioxide pipeline in China has been put into operation[N]. Guangming Daily, 2023-07-12(10).

[6] 闫光龙，郭克星，牛爱军，高杰，张阿昱，席敏敏. CO_2 管道设计的热力学挑战[J]. 石油管材与仪器，2023，9(3)：95-100. DOI：10.19459/j.cnki.61-1500/te.2023.03.018.

YAN G L, GUO K X, NIU A J, GAO J, ZHANG A Y, XI M M. Thermodynamic challenges of CO_2 pipeline design[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2023, 9(3): 95-100.

[7] 陈思锭，张哲，王春燕，曾禄轩，张磊，王念榕，等. 浅谈 CCS/CCUS 中 CO_2 管道输送对气质的要求[J]. 油气与新能源，2022，34(2)：71-81. DOI：10.3969/j.issn.2097-0021.2022.02.012.

CHEN S D, ZHANG Z, WANG C Y, ZENG L X, ZHANG L, WANG N R, et al. Quality requirements for CO_2 streams entering a pipeline transportation system in CCS/CCUS projects[J]. Petroleum and New Energy, 2022, 34(2): 71-81.

[8] 孙小喆，薛倩，李遵照，王晓霖，王唯. 多元杂质对 CO_2 相态特性影响研究[J]. 当代化工，2023，52(5)：1062-1067. DOI：10.13840/j.cnki.cn21-1457/tq.2023.05.001.

SUN X Z, XUE Q, LI Z Z, WANG X L, WANG W. Study on the effect of multiple impurities on the phase properties of CO_2[J]. Contemporary Chemical Industry, 2023, 52(5): 1062-1067.

[9] 李玉星，刘梦诗，张建. 气体杂质对 CO_2 管道输送系统安全的影响[J]. 天然气工业，2014，34(1)：108-113. DOI：10.3787/j.issn.1000-0976.2014.01.017.

LI Y X, LIU M S, ZHANG J. Impacts of gas impurities on the security of CO_2 pipelines[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(1): 108-113.

[10] 赵青，李玉星. 杂质对管道输送 CO_2 相特性的影响规律[J]. 油气储运，2014，33(7)：734-739，743. DOI：10.6047/j.issn.1000-8241.2014.07.010.

ZHAO Q, LI Y X. Impact of impurities on the phase behavior of CO_2 in pipeline transportation[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(7): 734-739, 743.

[11] 闫兴清，李佳桐，喻健良，曹琦，闫振汉，于帅，等. 超临界/密相二氧化碳长输管道内径计算方法探讨[J]. 石油化工设备，2020，49(4)：22-26. DOI：10.3969/j.issn.1000-7466.2020.04.005.

YAN X Q, LI J T, YU J L, CAO Q, YAN Z H, YU S, et al. Discussion on inner diameter calculation methods of

supercritical/dense carbon dioxide long-distance transportation pipeline[J]. Petro-Chemical Equipment, 2020, 49(4): 22-26.

[12] 刘敏，滕霖，李玉星，李顺丽，李万莉，张大同. 适用于超临界 CO_2 管道输送的水力模型及特性研究[J]. 油气田地面工程，2016，35（6）：14-17. DOI：10.3969/j.issn.1006-6896.2016.6.005.
LIU M, TENG L, LI Y X, LI S L, LI W L, ZHANG D T. Study on hydraulic model and characteristics for supercritical CO_2 pipelines[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2016, 35(6): 14-17.

[13] 刘敏. 超临界二氧化碳管道输送瞬变特性研究[D]. 青岛：中国石油大学（华东），2015.
LIU M. The transient characteristics of supercritical carbon dioxide pipelines[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2015.

[14] 王雅熙，李科，李天雷，徐梦林，毕鉴，张曙旋，等. CO_2 长输管道清管作业的影响因素[J]. 油气储运，2023，42（4）：391-397. DOI：10.6047/j.issn.1000-8241.2023.04.003.
WANG Y X, LI K, LI T L, XU M L, BI J, ZHANG S X, et al. Influencing factors of pigging operation for CO_2 long-distance pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(4): 391-397.

[15] 王超，赵建帮. 超临界-密相 CO_2 管道输送工艺仿真及优化[J]. 工程建设与设计，2023（23）：130-134. DOI：10.13616/j.cnki.gcjsysj.2023.12.039.
WANG C, ZHAO J B. Simulation and optimization of supercritical-dense-phase CO_2 pipeline transportation process[J]. Construction & Design for Engineering, 2023(23): 130-134.

[16] 李欣泽，孙佳奇，袁亮，张超，王梓丞，孙晨，等. 超临界 CO_2 管道安全停输再启动过程和安全停输时间影响因素[J/OL]. 大庆石油地质与开发：1-12[2024-01-07]. https://doi.org/10.19597/J.ISSN.1000-3754.202309002. DOI：10.19597/J.ISSN.1000-3754.202309002.
LI X Z, SUN J Q, YUAN L, ZHANG C, WANG Z C, SUN C, et al. Restart process after safe shutdown and influencing factors of safe shutdown time of supercritical CO_2 pipeline[J/OL]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing: 1-12[2024-01-07]. https://doi.org/10.19597/J.ISSN.1000-3754.202309002.

[17] 杨梅，李光荣，彭期耀，廖帆，武东战. 超临界-密相，气相二氧化碳管道输送研究[J]. 广州化工，2023，51（12）：90-92，141. DOI：10.3969/j.issn.1001-9677.2023.12.026.
YANG M, LI G R, PENG Q Y, LIAO F, WU D Z. Study on tube transportation of carbon dioxide in supercritical-dense phase and gas phase[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2023, 51(12): 90-92, 141.

[18] 曹功泽，刘宁，刘凯丽，淳于朝君，张冰岩，杨景辉，等. CCUS 腐蚀控制技术对策[J]. 大庆石油地质与开发，2024，43（1）：112-118. DOI：10.19597/J.ISSN.1000-3754.202307013.
CAO G Z, LIU N, LIU K L, CHUNYU Z J, ZHANG B Y, YANG J H, et al. Technical solutions for CCUS corrosion control[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2024, 43(1): 112-118.

[19] SUN C, SUN J B, WANG Y, LIN X Q, LI X D, CHENG X K, et al. Synergistic effect of O_2, H_2S and SO_2 impurities on the corrosion behavior of X65 steel in water-saturated supercritical CO_2 system[J]. Corrosion Science, 2016, 107: 193-203. DOI: 10.1016/j.corsci.2016.02.032.

[20] SUN J B, SUN C, WANG Y. Effects of O_2 and SO_2 on water chemistry characteristics and corrosion behavior of X70 pipeline steel in supercritical CO_2 transport system[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2018, 57(6): 2365-2375. DOI: 10.1021/acs.iecr.7b04870.

[21] WANG H E, SHEN K L, TANG S, SHEN R Q, PARKER T, WANG Q S. Synergistic effect of O_2 and SO_2 gas impurities on X70 steel corrosion in water-saturated supercritical CO_2[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2019, 130: 57-66. DOI: 10.1016/j.psep.2019.07.017.

[22] ZENG Y M, LI K Y. Influence of SO_2 on the corrosion and stress corrosion cracking susceptibility of supercritical CO_2 transportation pipelines[J]. Corrosion Science, 2020, 165: 108404. DOI: 10.1016/j.corsci.2019.108404.

[23] SUN C, SUN J B, LIU S B, WANG Y. Effect of water content on the corrosion behavior of X65 pipeline steel in supercritical CO_2-H_2O-O_2-H_2S-SO_2 environment as relevant to CCS application[J]. Corrosion Science, 2018, 137: 151-162. DOI: 10.1016/j.corsci.2018.03.041.

[24] 殷布泽，闫锋，聂超飞，芦澍，胡其会，李玉星. 基于 PHAST 的 CO_2 露空管道大规模泄漏与放空模拟[J]. 油气与新能源，2023，35（6）：82-89. DOI：10.3969/j.issn.2097-0021.2023.06.012.
YIN B Z, YAN F, NIE C F, LU S, HU Q H, LI Y X. Large scale venting and leakage simulation of exposed CO_2 pipelines based on PHAST[J]. Petroleum and New Energy, 2023, 35(6): 82-89.

[25] 滕霖. 超临界 CO_2 管道泄漏扩散特性及定量风险评估研究[D]. 青岛：中国石油大学(华东)，2019.
TENG L. The leakage and dispersion characteristics and quantitative risk assessment of supercritical CO_2 released from pipelines[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2019.
[26] 陈磊，闫兴清，胡延伟，于帅，杨凯，陈绍云，等. 二氧化碳管道意外泄漏减压过程的断裂控制研究进展[J]. 化工进展，2022，41(3)：1241-1255. DOI：10.16085/j.issn.1000-6613.2021-2096.
CHEN L, YAN X Q, HU Y W, YU S, YANG K, CHEN S Y, et al. Research progress on fracture control of accidental leakage and decompression in CO_2 pipeline transportation[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(3): 1241-1255.
[27] 陈兵，郭焕焕，崔维刚，肖红亮. 含杂质 CO_2 管道泄漏扩散模拟分析[J]. 石油与天然气化工，2019，48(3)：104-109. DOI：10.3969/j.issn.1007-3426.2019.03.019.
CHEN B, GUO H H, CUI W G, XIAO H L. Simulation analysis of leakage and diffusion of carbon dioxide with impurities[J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2019, 48(3): 104-109.
[28] HU Y W, YAN X Q, CHEN L, YU S, LIU C Y, YU J L. Leakage hazard distance of supercritical CO_2 pipelines through experimental and numerical studies[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2022, 119: 103730. DOI: 10.1016/j.ijggc.2022.103730.
[29] 郭晓璐，喻健良，闫兴清，徐鹏，徐双庆. 超临界 CO_2 管道泄漏特性研究进展[J]. 化工学报，2020，71(12)：5430-5442. DOI：10.11949/0438-1157.20200453.
GUO X L, YU J L, YAN X Q, XU P, XU S Q. Research progress on leakage characteristics of supercritical CO_2 pipeline[J]. CIESC Journal, 2020, 71(12): 5430-5442.
[30] 孙明源. CO_2 输送管道裂纹扩展及止裂技术研究进展[J]. 安全、健康和环境，2023，23(11)：40-47. DOI：10.3969/j.issn.1672-7932.2023.11.008.
SUN M Y. Research progress on crack propagation and crack arrest technology of CO_2 transport pipeline[J]. Safety Health & Environment, 2023, 23(11): 40-47.
[31] 殷布泽，黄维和，苗青，闫锋，欧阳欣，胡其会，等. CO_2 管道泄漏减压特性与裂纹扩展研究现状及发展趋势[J]. 油气储运，2023，42(9)：1042-1054. DOI：10.6047/j.issn.1000-8241.2023.09.008.
YIN B Z, HUANG W H, MIAO Q, YAN F, OUYANG X, HU Q H, et al. Status and development trends of research on CO_2 decompression characteristics and crack propagation[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(9): 1042-1054.
[32] BOTROS K K, GEERLIGS J, ROTHWELL B, ROBINSON T. Measurements of decompression wave speed in pure carbon dioxide and comparison with predictions by equation of state[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2016, 138(3): 031302. DOI: 10.1115/1.4031941.
[33] COSHAM A, JONES D G, ARMSTRONG K, ALLASON D, Barnett J. The decompression behaviour of carbon dioxide in the dense phase[C]. Calgary: 2012 9th International Pipeline Conference, 2012: 447-464.
[34] GUO X L, XU S Q, CHEN G J, YAN X Q, CAO Q. Fracture criterion and control plan on CO_2 pipelines: theory analysis and full-bore rupture (FBR) experimental study[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2021, 69: 104394. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104394.
[35] 郭晓璐. CO_2 管道泄漏中介质压力响应、相态变化和扩散特性研究[D]. 大连：大连理工大学，2017.
GUO X L. Pressure response, phase transition and dispersion characteristics during CO_2 pipeline releases[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
[36] 李玉星，王财林，胡其会，龚霁昱. 含杂质超临界 CO_2 管道减压波波速的预测模型[J]. 油气储运，2021，40(9)：1027-1032. DOI：10.6047/j.issn.1000-8241.2021.09.008.
LI Y X, WANG C L, HU Q H, GONG J Y. Prediction model of decompression wave velocity in supercritical CO_2 pipelines containing impurities[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(9): 1027-1032.
[37] 鲁寨军，王甲强，张梓轩，孙永龙，王根达，刘东润. 基于查表插值算法的高压 CO_2 管道泄漏瞬态特性数值模拟[J]. 安全与环境学报，2023，23(2)：442-450. DOI：10.13637/j.issn.1009-6094.2021.1814.
LU Z J, WANG J Q, ZHANG Z X, SUN Y L, WANG G D, LIU D R. Numerical study on the transient behaviour of high-pressure CO_2 pipeline leakage based on lookup table interpolation algorithm[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(2): 442-450.
[38] ZHANG Z X, LU Z J, WANG J Q, LIU D R, XIAO C H, FAN D K. Effects of initial flow velocity on decompression behaviours

of GLE CO_2 upstream and downstream the pipeline[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2022, 118: 103690. DOI: 10.1016/j.ijggc.2022.103690.

[39] 李鹤，谢萍，庞艳凤，杨明，池强，霍春勇. 全尺寸气体爆破试验用管道设计技术难点[J]. 石油管材与仪器，2020，6（1）：32–35. DOI：10.19459/j.cnki.61-1500/te.2020.01.008.

LI H, XIE P, PANG Y F, YANG M, CHI Q, HUO C Y. Technology problems of pipeline design for the full-scale burst testing[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2020, 6(1): 32–35.

[40] 池强，杨坤，李鹤，李炎华. 高钢级管道全尺寸气体爆破试验技术研究[J]. 焊管，2019，42（7）：78–82，89. DOI：10.19291/j.cnki.1001-3938.2019.7.009.

CHI Q, YANG K, LI H, LI Y H. Research on full-scale gas blasting test technology for high-grade pipeline[J]. Welded Pipe and Tube, 2019, 42(7): 78–82, 89.

[41] CHEN L, HU Y W, YANG K, YAN X Q, YU S, YU J L, et al. Fracture process characteristic study during fracture propagation of a CO_2 transport network distribution pipeline[J]. Energy, 2023, 283: 129060. DOI: 10.1016/j.energy.2023.129060.

[42] ZHEN Y, ZU Y Z, CAO Y G, NIU R Y. Effect of accurate prediction of real-time crack tip position on dynamic crack behaviors in gas pipeline[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2021, 94: 104136. DOI: 10.1016/j.jngse.2021.104136.

[43] 李鹤，李洋，王鹏，霍春勇，冯耀荣，吉玲康. X80 管线钢管动态裂纹扩展速度计算[J]. 压力容器，2013，30（2）：33–35，21. DOI：10.3969/j.issn.1001-4837.2013.02.005.

LI H, LI Y, WANG P, HUO C Y, FENG Y R, JI L K. Calculation of dynamic crack propagation velocities for X80 line pipe[J]. Pressure Vessel Technology, 2013, 30(2): 33–35, 21.

[44] 杨可嘉. 多相流模拟软件 LedaFlow 与 OLGA 的对比分析研究[D]. 北京：中国石油大学（北京），2018.

YANG K J. Comparison of multiphase flow simulators OLGA and LedaFlow[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2018.

[45] 颜筱函，陈宏举，陈晶华，张文欣，柳歆. 海底管道输送密相 CO_2 的泄放特性[J]. 中国海上油气，2023，35（6）：173–180. DOI：10.11935/j.issn.1673-1506.2023.06.019.

YAN X H, CHEN H J, CHEN J H, ZHANG W X, LIU X. Pressure release characteristics of dense-phase CO_2 subsea pipeline[J]. China Offshore Oil and Gas, 2023, 35(6): 173–180.

[46] 荆玉治，任柏璋. CO_2 管道泄放过程模拟研究[J]. 内蒙古石油化工，2020，46（6）：23–25. DOI：10.3969/j.issn.1006-7981.2020.06.008.

JING Y Z, REN B Z. Study on Simulation of CO_2 pipeline discharge process[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2020, 46(6): 23–25.

[47] 陈俊文，汤晓勇，刘勇，陈杰，胡其会，李玉星，等. 超临界 CO_2 管道破裂泄漏影响探讨[J]. 天然气与石油，2023，41（2）：1–8. DOI：10.3969/j.issn.1006-5539.2023.02.001.

CHEN J W, TANG X Y, LIU Y, CHEN J, HU Q H, LI Y X, et al. Discussion on the impact of supercritical CO_2 pipeline rupture leakage[J]. Natural Gas and Oil, 2023, 41(2): 1–8.

[48] 程浩力. 国内外 CO_2 管道设计规范要点[J]. 油气储运，2024，43（1）：32–39. DOI：10.6047/j.issn.1000-8241.2024.01.004.

CHENG H L. Discussion on essential points in Chinese and foreign standards for CO_2 pipeline design[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(1): 32–39.

[49] 陈嘉琦，蒲明，李育天，张斌，王晓峰，孙骥姝，等. 国内外 CO_2 管道设计标准对比分析[J]. 油气与新能源，2023，35（1）：94–100. DOI：10.3969/j.issn.2097-0021.2023.01.012.

CHEN J Q, PU M, LI Y T, ZHANG B, WANG X F, SUN J S, et al. Discussion on domestic and overseas standards for the design of CO_2 pipeline[J]. Petroleum and New Energy, 2023, 35(1): 94–100.

（编辑：刘朝阳）

基金项目：国家重点研发计划“战略性科技创新合作”专项“区域二氧化碳捕集与封存关键技术研发与示范”，2022YFE0206800；国家石油天然气管网集团有限公司科技专项课题“超临界 CO_2 管道输送工艺与安全技术”，SSCC202107。

作者简介：张对红，男，1970 年生，教授级高级工程师，1999 年博士毕业于中国石油大学（北京）油气储运工程专业，现主要从事新能源储运、CCUS 及大型油气管网仿真技术方面的研究工作。地址：河北省廊坊市广阳区金光道 51 号，065000。电话：0316-2073092。Email：zhangdh@pipechina.com.cn

• Received: 2024-01-26
• Revised: 2024-02-21
• Online: 2024-02-22

